



Review af eksisterende viden om plantetilgængelighed af fosfor i forskellige slamprodukter

Glæsner, Nadia; Lemming, Camilla; Magid, Jakob; Jensen, Lars Stoumann

Publication date:
2016

Document version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):
Glæsner, N., Lemming, C., Magid, J., & Jensen, L. S. (2016). *Review af eksisterende viden om plantetilgængelighed af fosfor i forskellige slamprodukter*. Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet.

REVIEW AF EKSISTERENDE VIDEN OM PLANTETILGÆNGELIGHED AF FOSFOR I FORSKELLIGE SLAMPRODUKTER



Nadia Glæsner, Camilla Lemming, Jakob Magid og Lars Stoumann Jensen

Projekt for Miljøstyrelsen

Marts / 2016

Titel

Review af eksisterende viden om plantetilgængelighed af fosfor i forskellige slamprodukter

Forfattere

Nadia Glæsner, Camilla Lemming, Jakob Magid og Lars Stoumann Jensen
Institut for Plante- og Miljøvidenskab
Københavns Universitet
Thorvaldsensvej 40
1871 Frederiksberg C
Tlf. 3533 3560
PLEN@plen.ku.dk
www.plen.ku.dk

Opdragsgiver

Miljøstyrelsen, Miljøministeriet

Forsidefotos

Spredning af komposteret slam, ©Københavns Universitet.

Publicering

Rapporten er publiceret på www.plen.ku.dk hvor den frit kan downloades

Bedes Citeret

Glæsner N., Lemming C., Magid J. og Jensen L.S. (2016) Review af eksisterende viden om plantetilgængelighed af fosfor i forskellige slamprodukter. Rapport for Miljøstyrelsen, udgivet af Institut for Plante- og Miljøvidenskab, Københavns Universitet. 21 s.

Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse

Skriftlig tilladelse kræves, hvis man vil bruge instituttets navn og/eller dele af denne rapport i sammenhæng med salg og reklame.

INDHOLDSFORTEGNELSE

HIGHLIGHTS.....	4
FORORD	5
1. INTRODUKTION	6
2. OVERBLIK OVER SLAMPRODUKTER I DANMARK.....	6
3. GENNEMGANG AF DE NYESTE INTERNATIONALE OG DANSKE STUDIER OM FOSFORTILGÆNGELIGHED AF SLAMPRODUKTER	8
3.1 Datagrundlag og metoder	8
3.2 Resultater	9
3.3 Danske forsøgsresultater	11
4. KONKLUSIONER.....	13
5. VIDENS-HULLER OG FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØGELSER.....	14
LITTERATUR	15
APPENDIX - OVERSIGTSTABEL	17

HIGHLIGHTS

Et litteratur review af i alt 19 studier og undersøgelser (potte- og markforsøg) af den umiddelbare fosfor (P) gødningsvirkning af forskellige typer spildevandsslam og afledte produkter i forskellige plantearter og jordtyper er gennemført med henblik på at opgøre den relative gødningsvirkning på kort sigt i forhold til en uorganisk handelsgødning som fosforkilde. Sammenstillingen viser at:

- Fosfortilgængeligheden af slamprodukter varierer, afhængig af hvordan produkterne er afledt og behandlet i spildevands- og slamprocessen.
- Struvit og slam fra spildevandsrensning med biologisk P-fjernelse viste sig at være de slamprodukter, der i gennemsnit giver den højeste gødningsvirkning, idet de fleste studier viste samme eller højere plantetilgængelighed af fosfor i disse produkter sammenlignet med handelsgødning.
- Kemisk fældet slam viste varierende resultater, formodentlig afhængigt af fældningsbetingelserne. Desuden viste pH-værdien af slamproduktet samt jordens pH sig at have betydning for planternes udnyttelse af fosfor i slamproduktet.
- Stabiliseret slam i form af anaerob og aerob udrådning var svært at isolere fra andre behandlingsprocesser for slammet, og det var derfor ikke muligt at vurdere hvilken indflydelse stabilisering af slam har på fosfortilgængelighed
- Termisk tørring af slam reducerede generelt dets fosfortilgængelighed
- Ubehandlet slamaske viste stor variation mellem studierne, men havde generelt en relativt lav gødningsvirkning i forhold til handelsgødning
- Behandlet slamaske har i flere studier vist samme eller højere plantetilgængelighed end handelsgødning, og viste klart højere plantetilgængelighed end ubehandlet slamaske

FORORD

Nærværende projekt er finansieret af Miljøstyrelsen med henblik på at understøtte arbejdet i dansk fosfor netværk. Projektet har til formål at gennemføre en litteraturscreening og review af eksisterende nyere viden (videnskabelige artikler såvel som conferencebidrag og rapporter) om tilgængeligheden af fosfor (P) i de vigtigste af samfundets affaldsstrømme og afledte produkter, først og fremmest forskelligt behandlet spildevandsslam (biogødning) og andre produkter fra spildevandrensning (f.eks. udfældede salte eller aske fra afbrænding af slam). Vi forsøger i rapporten at opsummere, hvordan de forskellige biogødninger og relaterede gødningsprodukter virker på biomasseproduktion (udbytte) og plante P optag i forhold til handelsgødning P.

Projektet har været fulgt af en følgegruppe bestående af:

- Linda Bagge, Miljøstyrelsen
- Sune Aagot Sckerl, HedeDanmark
- Per Halkjær Nielsen, Aalborg Universitet
- Sven Sommer, Syddansk universitet
- Henrik Bang Jensen, Landbrug fødevarer
- Lisbeth Ottosen, DTU
- Mette Dam Jensen, Krüger
- Aviaja Anna Hansen, Krüger

Lars Stoumann Jensen

Professor i Jordfrugtbarhed og Recirkulering af Affaldsressourcer

Institut for Plante- og Miljøvidenskab

Københavns Universitet

1. INTRODUKTION

Fosfor er et essentielt næringsstof for afgrødeproduktion i jordbruget. Forsyning af afgrøderne med fosfor sker i Danmark hovedsageligt via tilførsel af husdyrgødning, men også via handelsgødning og andre organiske gødninger. Andre organiske gødninger er især spildevandsslam (også kaldet biogødning) fra rensningsanlæg og industrivirksomheder (fødevare og fermenteringsvirksomheder), men i stigende grad også digestat fra biogasanlæg, der fødes med både husdyrgødning og andet organisk affald.

De globale fosforreserver forventes at udtømmes inden for en overskuelig fremtid, hvilket har fået EU til at føje fosfor til "list of Critical Raw Materials". Øget recirkulering af fosfor fra rest- og affaldsprodukter indgår derfor i højere og højere grad i internationale såvel som nationale ressource-strategier. Spildevandsslam er en fosforholdig ressource som allerede benyttes i udstrakt grad på dansk landbrugsjord, enten direkte eller indirekte (ca. ¾ af al spildevandsslam, Sckerrl 2012).

Der har i perioder været diskussioner i jordbrugserhvervet i forbindelse med brug af slam som fosforressource, dels på grund af usikkerheden om forurening med tungmetaller og miljøfremmede stoffer, men også fordi den generelle forståelse har været, at fosfor er bundet mere eller mindre hårdt i kemisk fældede slamprodukter, der gør fosfor relativt utilgængelig for afgrøderne på kort sigt.

Der foreligger efterhånden en lang række videnskabelige studier, som afdækker usikkerheden omkring miljøfremmede stoffer, og tungmetallindholdet i slam er faldet væsentligt i de senere år (Ingvertsen et al., 2010). Der er dog usikkerhed om, hvor stor plantetilgængeligheden er af den fosforpulje, der findes i slam og afledte produkter, hvilket giver usikkerhed om gødningsværdien af disse ved brug på landbrugsjord og vanskeliggør vurdering af effektivitet og behovet for yderligere behandling. Generelt kan man sige, at fosfortilgængeligheden fra forskellige restprodukter afhænger af dels gødningstypen (dvs. fosfors bindingsform, reaktivitet, opløselighed, bionedbrydelighed) og dennes P-koncentration, pH og oprindelse, dels af afgrødetype (vækstlængde, rodudvikling, etc.), dels af jordtype (tekstur, mineralogi, P status, pH).

Koncentrationen af plantetilgængeligt fosfor i jord er generelt meget lav, så planter er afhængige af både den fosforpulje der er i jordvæsken (meget lav) og af den fosforpulje der kan frigives fra bindingssites på jordpartikler, hvilket komplicerer billedet af fosfortilgængelighed ved forskellige fosforgødninger. Da det alene er det opløselige uorganiske orthofosfat i slamprodukter der er umiddelbart plantetilgængeligt, er den potentielle plantetilgængelighed af det resterende fosfor afhængig af mineralisering af organiske fosforpuljer og/eller muligheden for at de udfældede eller mere hårdt bundne uorganiske fosfatpuljer bringes i opløsning.

Med øget fokus på at udnytte spildevandsslam og afledte produkter som gødningsressource på landbrugsjord, har Miljøstyrelsen ønsket den eksisterende viden om gødningsværdien af slamprodukter til brug på landbrugsjord belyst. Formålet med denne rapport har derfor været at reviewe og sammenstille den nyeste litteratur omkring plantetilgængelighed og gødningsværdi af fosfor i forskellige slamprodukter.

2. OVERBLIK OVER SLAMPRODUKTER I DANMARK

Slamprodukter er et resultat af den rensningsproces spildevand gennemgår på et rensningsanlæg, så det rensede spildevand kan udledes sikkert til vandmiljøet. De afledte slamprodukter er derfor affaldsprodukter, men på grund af disses høje indhold af næringsstoffer er de også potentielle gødningsprodukter. Der er derfor i disse år stort fokus på at udvikle nye spildevands- og slambehandlingsprocesser, som i højere grad muliggør

udnyttelse og recirkulering af fosfor i spildevandsstrømmen, se Kabbe et al. (2015), Adam et al. (2015) og Egle et al. (2015) for mere uddybende sammenligninger af processer og metoder.

Tabel 1 giver en oversigt over typiske spildevandsprocesser der anvendes på rensningsanlæg i Danmark og som kan formodes at påvirke fosfortilgængeligheden af slamproduktet. Der benyttes ofte en kombination af de nævnte processer, hvorfor det kan være vanskeligt at skille effekten af de enkelte faktorer.

En af de nye processer, som der internationalt samler sig betydelig opmærksomhed omkring som en meget lovende spildevandsteknologi er struvitfældning, som der imidlertid pt. kun er implementeret på ganske få rensningsanlæg i Danmark. Der findes endvidere adskillige metoder til at behandle aske fra tørret og forbrændt spildevandsslam, se Kabbe et al. (2015) og Egle et al. (2015)., men mest fokus har samlet sig omkring termokemisk behandling (Adam et al., 2015).

Tabel 1. Typiske processer der leder til slamprodukter i Danmark (og som kan have betydning for plantetilgængeligheden af P) og nogle alternative processer, der potentielt vil få udbredelse til P recovery.

Proces til fosforfjernelse i spildevandsprocessen:	
Biologisk	<ul style="list-style-type: none"> • Bio-P eller EBPR=Enhanced biological P removal
Kemisk	<ul style="list-style-type: none"> • Al-salte • Fe-salte • Ca-salte • Al+Fe
Kemisk + biologisk	<ul style="list-style-type: none"> • Kombination af ovenstående
Noter	<i>Der findes kun få anlæg med ren Bio-P i DK, dvs. anlæg helt uden tilsætning af kemikalier. Typisk vil Bio-P/EBPR altså være kombineret med tilsætning af kemikalier. Typiske kemikalier i DK er Al- og Fe-salte.</i>
Slambehandling:	
Stabiliseringsprocesser	<ul style="list-style-type: none"> • Anaerob udrådning • Aerob udrådning (f.eks. STRB=Reed-bed mineralisering) • Kompostering • Basisk stabilisering (tilsætning af kalk)
Processer til at facilitere slutdisponering af slammet	<ul style="list-style-type: none"> • Afvanding enten mekanisk separation (centrifuge, skruepresse etc.) eller passiv som fx i STRB (som dog også er en stabiliseringsproces) • Tørring (termisk) • Forbrænding
Noter	<i>Der findes flere processer, men de mest relevante er nævnt her. Typisk vil stabiliseringsprocesser og processer til at facilitere slutdisponering dog flyde sammen og effekten af de enkelte delprocesser være svær at adskille. Mekanisk afvanding vil stort set altid være nødvendig. Tørring (som ofte også betegnes som en afvandingsproces) kan ske enten til et slutprodukt (ca. 85-95% tørstof) eller som forberedelse til forbrænding (ca. 30-40% tørstof).</i>
Alternative processer med "P recovery" som formål:	
Kontrolleret struvitudfældning	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrolleret struvitudfældning kan ske flere steder i processerne, men oftest på rejektivandsstrømmen (vand der kommer ud af slamafvandingen)
Behandling af aske	<ul style="list-style-type: none"> • Termokemisk behandling (eks. AshDec processen hvor slamasken behandles med Na₂SO₄, MgCl₂ eller Na₂CO₃ under 900-1000°C; Wilken et al. 2015)
Noter	<i>Struvitudfældning anvendes pt. kun på tre rensningsanlæg i DK (Aabyhøj og Herning i drift, Helsingør er pt. under indkøring), men forventes implementeret på flere indenfor den nærmeste fremtid. Der findes adskillige metoder til at behandle aske, se Kabbe et al. (2015) og Egle et al. (2015).</i>

3. GENNEMGANG AF DE NYESTE INTERNATIONALE OG DANSKE STUDIER OM FOSFORTILGÆNGELIGHED AF SLAMPRODUKTER

3.1 DATAGRUNDLAG OG METODER

Der er inddraget i alt 19 studier og undersøgelser af P gødningsvirkning af forskellige typer spildevandsslam og afledte produkter, overvejende publiceret i videnskabelige tidsskrifter, men også et par enkelte undersøgelser fra conference-proceedings eller nationale rapporter er inddraget, hvis de er fundet relevante og af god eksperimentel standard. Der indgår overvejende potte- men også et enkelt markforsøg, og forskellige afgrøder/plantearter og jordtyper, yderligere detaljer kan findes i Appendix. Der er kun medtaget forsøg, hvor der indgår reference behandlinger med en uorganisk handelsgødning som P kilde og hvor der er målt en positiv respons (udbytte eller P optag) på denne P tilførsel i handelsgødning.

Opgørelsen er grupperet i forhold til hvilke processer, der er anvendt i spildevandsbehandling og slamefterbehandling. Desuden er de to alternative processer beskrevet i tabel 1 inddraget, da disse er de eneste, hvor der findes flere solide plante-baserede studier af P plantetilgængelighed i produktet.

Gødningsudnyttelsen, er opgjort som øgning i forhold til ugødet i henholdsvis udbytte/plantebiomasse eller P optag per enhed tilført P i slamproduktet, jf Roberts og Johnston (2015):

$$RE_X = \frac{U_{PX} - U_0}{F_{PX}} \quad \text{og} \quad UE_X = \frac{Y_X - Y_0}{F_{PX}}$$

Hvor RE_X er *P Recovery Efficiency* af P i gødningsmiddel X (enten slamprodukt eller referencegødning, typisk i form af triplesuperfosfat, TSP, eller lignende lettilgængelig mineralsk handelsgødning), og $U_{PX} - U_0$ er øgningen i P optag i plantebiomasse/afgrøde tilført gødningsmiddel X minus P optag i den ugødede behandling, mens F_{PX} er mængden af P i det tilførte gødningsmiddel X. Tilsvarende er UE_X udbytte effekten (Y) af det tilførte gødningsmiddel X.

I langt de fleste af de forsøg, der indgår i dette review, er der tilført samme mængde total P med slamprodukt og referencegødning, dvs. F_{PX} og F_{P-TSP} er ens.

Den **relative P gødningsvirkning** (Relative Fertiliser Equivalent, **RFE**) af slamprodukt X i forhold til den uorganiske referencegødning (TSP) opgjort på basis af enten P optagelse eller udbytte:

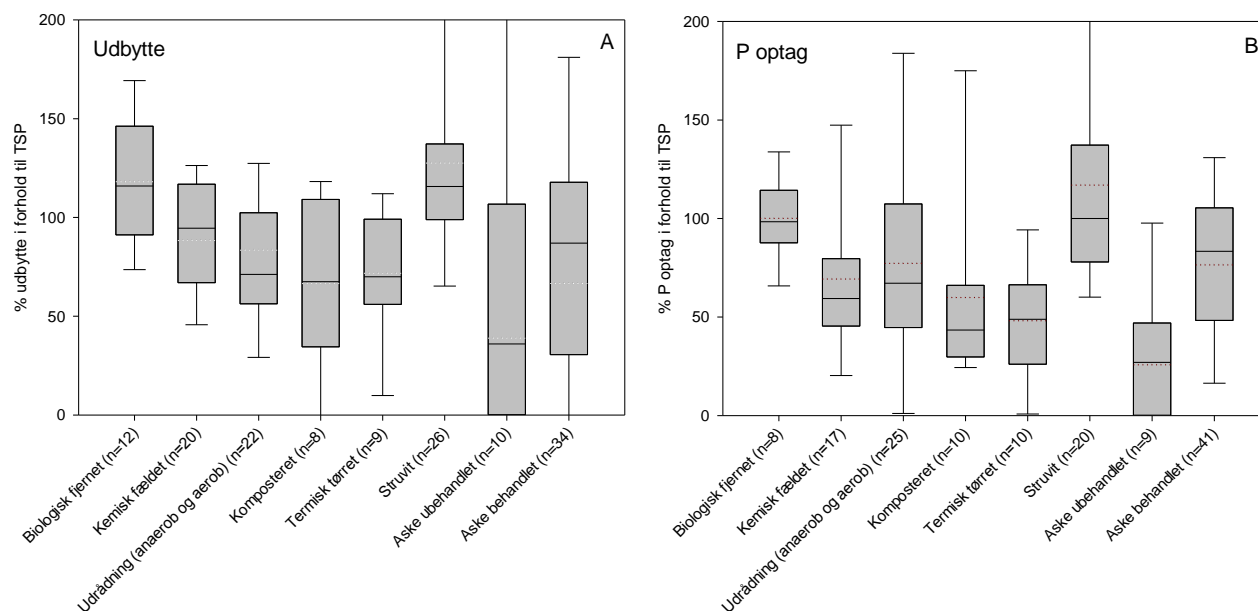
$$RFE_X = \frac{RE_X}{RE_{TSP}} \quad \text{og} \quad RFE_X = \frac{UE_X}{UE_{TSP}}$$

RFE_X har enheden %, hvor en værdi på < 100% indikerer at gødningen X har en ringere P virkning end TSP, mens en værdi >100% indikerer at den virker bedre.

Det er vigtigt at præcisere at alle de forsøg der indgår i dette review kun kigger på afgrøderespons over en vækstsæson, et enkelt år eller i enkelte tilfælde to år. Man skal også være opmærksom på, at den relative gødningsvirkning, RFE_X , påvirkes både af planteudnyttelsen af P i slamproduktet, men også af planteudnyttelsen af P i referencen, handelsgødning. I korterevarende forsøg (pottforsøg, 1-årige markforsøg) er planteudnyttelsen af P i handelsgødning ofte relativt lille, og den relative gødningsvirkning, RFE , af et slamprodukt kan derfor være ganske høj, men også usikkert bestemt; den vil imidlertid være det bedste estimat man kan få for P gødningsvirkning på kort sigt.

3.2 RESULTATER

Figur 1 præsenterer en opsummering af de fundne relative 1. års gødningsvirkninger (RFE, middelværdi, median og variation) fra de 19 internationale og danske studier af plantetilgængeligheden af fosfor i forskellige slamprodukter som er inddraget i dette review. Resultaterne er grupperet efter den sidste P fjernelses proces (det var ikke muligt at adskille de forskellige kemiske fældningsmetoder), slambehandlingsmetode og endelig to alternative processer (struvit og aske-behandling).



Figur 1. Relativ 1. års gødningsvirkning (RFE) i forhold til handelsgødning af forskellige slamprodukter, beregnet på basis af udbytte (A) og fosfor optag (B). Baseret på data fra de videnskabelige studier i appendix; studierne omfatter overvejende 1. årsvirkning, kun et enkelt inkluderer 2. årsvirkning. Boksen viser 10 og 90% percentiler, error-barer viser de højeste/laveste værdier, den fast optrukne linje viser median værdien og den stiplede linje viser gennemsnitsværdien. Grupperingen af resultater henviser til den sidste proces i slamprocessen, dvs. slamprodukterne i kategorien "kemisk fældet" indbefatter slamprodukter der er kemisk fældet samt produkter der har været udsat for biologisk P fjernelse og yderligere kemisk fældet; "Udrådnet" vil typisk omfatte slam der først både er biologisk og kemisk fældet; "Komposteret" og "Tørret" vil ofte være både fældet og udrådnet først. Antal af forsøgsled/behandlinger (n) der indgår er opgivet efter hvert slamprodukt gruppe. NB! Der er alene medtaget data fra forsøg hvor TSP har resulteret i øget plantevækst sammenlignet med en ugødet kontrol.

Af figur 1 ses, at der er endog meget stor variation i resultaterne fra de forskellige studier, også indenfor grupperingen af slamprodukter. Variationen er i en vis grad påvirket af, at der foretages sammenligninger af differencer mellem de gødede behandlinger og kontrolbehandlingen, hvor der ikke er givet fosfor, og sammenligning af differencer giver større variation end sammenligning af absolutte værdier. Foruden de tolkningsvanskeligheder variationen i data giver anledning til, er generalisering på tværs af de forskellige studier vanskeliggjort af, at behandlingen af slammet varierer indenfor produkt grupperne, og at beskrivelser af disse ofte ikke indeholder detaljer eller helt mangler. Derudover er alle studierne udført under forskellige eksperimentelle forhold. En mere udførlig beskrivelse af de enkelte studier (planteart, jordtype/-status/-pH, mark/potte, gødningsniveau) kan findes i bilag 1.

Overordnet viser analysen dog, at tilgængeligheden af fosforpuljen i slamprodukter over det første vækstår i høj grad afhænger af den proces hvorved produktet er blevet fremstillet. Slam fra spildevandsrensning der kun er moderat behandlet, har en relativt høj fosfor-virkning sammenlignet med handelsgødning, således viser

slam fra biologisk P-fjernelse i flere studier endda højere fosforgødningsvirkning end handelsgødning, hvorimod kemisk fældet slam og stabiliseret slam (aerob og anaerob udrådning, kompostering) viser lavere og meget varierende fosforgødningsvirkning.

Gødningsvirkningen af disse må sandsynligvis afhænge meget af den proces hvorved produkterne er afledt, såsom hvilke og hvilken koncentration af fældningskemikalier der er brugt i udfældningen, samt af pH i både produkt og jorden. Tidligere studier har vist, at Ca-fældede produkter har større plantetilgængelighed end Fe- og Al-fældede produkter (Soon and Bates, 1982), men dette kom ikke klart frem i vores analyse, som dog også kun omfattede et enkelt studie med Ca-fældet slam, da Ca-fældning er i dag ikke en særlig udbredt metode. De fleste studier omfattede således Fe-fældning, og det var derfor heller ikke muligt at skelne mellem Fe- og Al-fældet slams fosforgødningsvirkning.

Mange produkter var udsat for flere processer fra tabel 1, dvs. både biologisk og kemisk fældning, dernæst eksempelvis udrådning og kompostering. Det var derfor svært at isolere udrådning som stabiliseringsmetode blandt studierne, da denne proces ofte var kombineret med kemisk fældning og/eller kompostering eller termisk tørring. Derfor var der stor variation mellem disse studier, men overordnet viste kemisk fældning, udrådning, kompostering og tørring at give medianværdier for gødningsværdi på ca. 60 % af handelsgødning.

For slamaske, dvs. termisk behandlet (tørret) og forbrændt slam, er fosforgødningsvirkningen lavest, især hvis der ses på P optaget, hvor virkningen i gennemsnit var under 50% af handelsgødning og kun i et enkelt tilfælde tæt på 100%. Termisk tørring viste sig generelt at reducere fosforgødningsvirkning i de fleste studier, hvor der indgik samme slam uden tørring. Slamaske viste ligeledes at have stor variation mellem studierne, men behandling af asken, specielt de behandlinger der inkluderede en syrebehandling af asken, resulterede i øget plantetilgængelighed af fosfor i forhold til ubehandlet slamaske. Behandlet slamaske viste medianværdier for relativ gødningsvirkning på ca. 85 % i forhold til handelsgødning, baseret på såvel udbytte som P optag. Dette stemmer godt overens med de overordnede konklusioner af EU projektet P-REX (Kabbe, 2015; Wilken et al., 2015).

For studierne der inkluderede struvit viser flere end halvdelen af dem en højere fosforgødningsvirkning end handelsgødning, uanset om der måles på udbytte eller P optag. Dette indikerer, at på trods af at struvit er et relativt svært opløseligt salt, så har dette tilsyneladende en god langsomt virkende evne til at forsyne planter med fosfor.

Flere af studierne har vist, at på trods af at slamprodukterne generelt har lavere umiddelbar opløselighed end kunstgødning, så er planteoptaget af fosfor samt udbytte af planterne ofte ækvivalent med eller i nogle tilfælde højere ved tilførsel af slamprodukter end med tilførsel af handelsgødningsfosfor (dvs. relativt udbytte eller P optag, RFE, over 100%).

Dette kan forklares med den relativt komplicerede kemi for fosfor i jord, hvor koncentration af opløst uorganisk P i jordvæsken kontrolleres af en lang række ligevægte, og hvor den rumlige fordeling af såvel den tilførte P kilde, de enkelte ligevægtsprocesser i jorden og ikke mindst planternes rodnet, har en afgørende betydning for effekten på plantens vækst og P optag. Det er derfor ikke usædvanligt at en letopløselig P kilde, såsom triplesuperfosfat (TSP), i nogle tilfælde diffunderer længere ud i jordmatricen, hvor den bindes stærkt, mens en mere gradvist opløselig P kilde ikke når at reagere med det samme jordvolumen, inden plantens rødder når at få adgang til dette. Ligeledes spiller puljen af organisk materiale, som tilføres med nogle slamprodukter, en vigtig rolle for tilgængeligheden af fosfor, idet organisk materiale konkurrerer med

bindingssites hvor fosfor adsorberes på jordpartikler, og derfor kan virke til at øge frigivelsen og plantetilgængeligheden af fosfor (Kahiluoto et al. 2015). Tilsætning af slam kan ligeledes ændre jordens kemiske forhold, f.eks. pH, der kan påvirke tilgængeligheden af jordens eksisterende fosforpulje, hvilket igen kan give højere udbytte og fosforoptag i afgrøderne.

Det skal også bemærkes at kun ganske få slamprodukter (aske undtaget) gav en negativ relativ gødningsvirkning (RFE) i de gennemgåede forsøg. Dette betyder altså at der ikke sker en hæmning, hvis der gødes med slamprodukter, hvor fosforet f.eks. er kemisk fældet, hvilket ellers ofte anføres som et argument mod at anvende slamprodukter.

Endelig er det vigtigt at huske på at langt hovedparten af de studier der kunne leve op til vores kriterier for valide forsøg (afsnit 3.1) er potte- eller kar-forsøg, og kun et enkelt markforsøg kunne inddrages i dette review. Dette kan have givet bias, da det er velkendt at respons på vækstfaktorer ofte er mere kraftig i potte- og karforsøg end under markforhold, hvor afgrøden har adgang til dybere jordlag, men også kan være udsat for mere stress (tørke, kulde). Der er imidlertid ikke mange publicerede markforsøg på dette område, og ofte er de af så ringe kvalitet eller uden reference eller respons at vi ikke kan inkludere dem i dette review.

3.3 DANSKE FORSØGSRESULTATER

Der er kun gennemført få undersøgelser af effekten af spildevandsslam og -produkter på fosforoptagelse i planter og planteudbytte under danske markforhold.

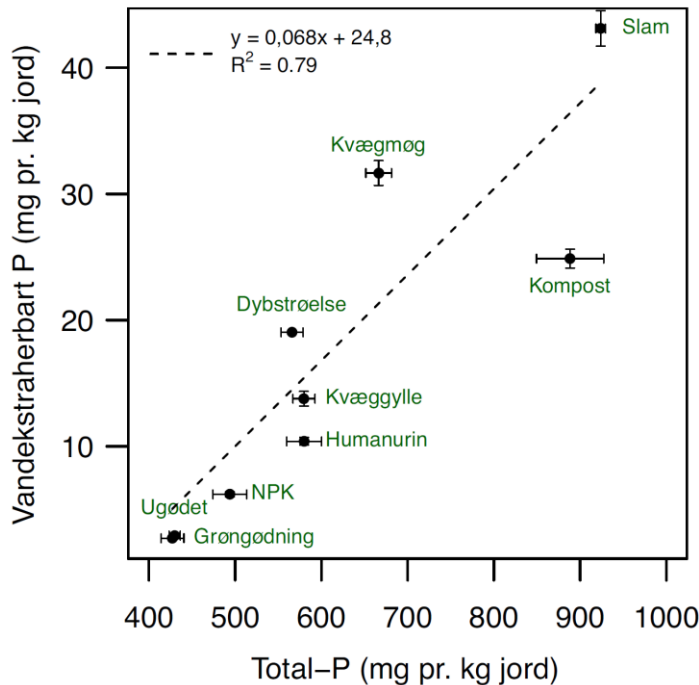
Under det Strategiske Miljøforskningprogram i slutningen af 1990'erne, blev en lang række effekter af spildevandsslam og andre affaldsprodukter på afgrødevækst og miljøpåvirkninger fra potentielle kontaminanter undersøgt (Petersen et al. 2003a), men desværre blev kun kvælstofvirkning (Petersen, 2003) kvantificeret i forhold til handelsgødning; et studie af fosforoptag med forskellige slamtyper var uden klare resultater, da der dels ikke indgik reference behandlinger med fosfor i handelsgødning, dels var en relativt høj jord P status på forsøgsarealet (Petersen et al. 2003b).

I det igangværende GUDP-financierede projekt "Gødningsværdi af fosfor i restprodukter" (GØDP) gennemføres forsøg med afprøvning af fosforvirkningen i struvit, slam, kildesorteret husholdningsaffald og halmaske på jorde med klar fosforrespons (Vestergaard, 2015). Disse resultater indgår i de data der er opgjort i Appendix 1 (ref. 14) og dermed i figur 1 under "kemisk fældet" og "struvit". Førsteårs relativ gødnings effekt målt på udbytte i vårbyg for de to slamtyper, Fe-fældet henholdsvis Al-fældet, svarede i gennemsnit af to forsøg til 45 og 59 procent, mens den for struvit var 100 procent af fosforeffekten af TSP. Resultater for 2. årsvirkning indikerer dog en større eftervirkning af de to slam-typer end af struvit og TSP. GØDP projektet afsluttes først i 2016, hvorfor der kan forventes yderligere resultater offentliggjort i det kommende år.

I indeværende review har vi valgt at fokusere på den umiddelbare gødningsvirkning af slamprodukterne, da denne ofte antages at være langt lavere end tilsvarende handelsgødning. For fosforholdige gødninger er det dog lige så vigtigt at kende den samlede virkning på lidt længere sigt, f.eks. 5-10 år.

I Københavns Universitets langvarigt markforsøg i Tåstrup (CRUCIAL-marken), som har til formål at belyse potentielle miljø- og sundhedsmæssige risici ved recirkulering af forskellige typer by-affald til landbrugsjord, har det også været muligt at detektere effekter på jordens frugtbarhed, herunder at langtidsvirkningen af fosfor i affaldsbiomasse varierer. I forsøget har de forskellige affaldsbiomasser været tilført i forhold til deres tilgængelige kvælstofindhold og flere har endda også været tilført i accelererede behandlinger, hvilket har resulteret i væsentligt forskellige totale P tilførsler gennem nu mere end 15 år. Dette vanskeliggør

sammenligning af fosfor gødningsvirkning for behandlinger, der har akkumuleret meget forskellige niveauer af total P i jorden. Men man kan sammenstille målinger af jordens indhold af total P med vandekstraherbart P (i et meget fortyndet forhold, som et mål for plantetilgængeligheden af jordens P pulje) som det er gjort i figur 2.



Figur 2. Sammenhæng mellem jordens totale indhold af P (x-aksen) og indhold af tilgængeligt P (y-aksen; målt som vandekstraherbart P fra jorden) for 9 behandlinger i CRUCIAL-forsøget efter ca 15 års kontinuert tilførsel af forskellige affaldsbiomasser. Usikkerhederne er angivet som standard error (n=3). Kilde: Magid et al. (2016)

Resultaterne illustreret i figur 2 kan fortolkes sådan, at produkter, der ligger over den stiplede linje, giver en bedre langtidsvirkning end gennemsnittet og omvendt med produkter/behandlinger, der ligger under den stiplede linje (Magid et al. 2016). Dette betyder, at fosfor i spildevandsslam tilsyneladende har en høj virkningsgrad på linje med kvæggylle og i hvert fald klart højere end for tilsvarende P tilførsler i kompost.

Disse tendenser blev bekræftet i potteforsøg med vårbyg (Lemming, endnu upubl.). Yderligere undersøgelser pågår pt. i projektet Integrated Ressource Management and Recovery (IRMAR), der først afsluttes i 2017, så også herfra forventes yderligere resultater offentliggjort i de kommende år.

4. KONKLUSIONER

Ovenstående analyse af internationale og danske studier af den umiddelbare plantetilgængelighed af fosfor fra slamprodukter viser, at den relative gødningsvirkning af slamprodukter varierer, afhængig af hvordan produkterne er afledt og behandlet i spildevands- og slambehandlingsprocessen. Der forekommer imidlertid betydelig variation forårsaget af andre faktorer, ofte af samme eller højere størrelsesorden som den direkte fosforvirkning, hvilket vanskeliggør entydige konklusioner. På baggrund af de analyserede kilder konkluderer vi dog at:

- **Struvit og slam fra spildevandsrensning med biologisk P-fjernelse** viste sig at være de slamprodukter, der i gennemsnit giver den højeste relative gødningsvirkning på kort sigt, idet de fleste studier viste samme eller højere plantetilgængelighed af fosfor i disse produkter end for handelsgødning.
- **Kemisk fældet slam** viste varierende resultater, formodentlig afhængigt af fældningsbetingelserne. Der var indikationer på at pH-værdien af slamproduktet samt jordens pH sig kan have betydning for planternes udnyttelse af fosfor i slamproduktet.
- **Stabiliseret slam** i form af anaerob og aerob udrådning var svært at isolere fra andre behandlingsprocesser for slammet, og det var derfor ikke muligt at vurdere hvilken indflydelse stabilisering af slam har på fosfortilgængelighed og relativ gødningsvirkning
- **Termisk tørring** af slam reducerede generelt dets relative umiddelbare gødningsvirkning
- Der var **stor variation mellem disse studier**, men medianen for den relative umiddelbare gødningsværdi overordnet på tværs af kemisk fældning, udrådning, kompostering og tørring var ca. 60 % af handelsgødning. Det vurderes altså at slamprodukter generelt har en relativt god umiddelbar fosfortilgængelighed sammenlignet med handelsgødning.
- **Ubehandlet slamaske** viste stor variation mellem studierne, men havde generelt en relativt lav umiddelbar gødningsvirkning i forhold til handelsgødning
- **Behandlet slamaske** har i flere studier vist samme eller højere plantetilgængelighed end handelsgødning, og viste en klart højere umiddelbar gødningsvirkning end ubehandlet slamaske

5. VIDENS-HULLER OG FORSLAG TIL VIDERE UNDERSØGELSER

Dette review af nyere videnskabelige studier har klart afdækket manglende viden på følgende punkter:

- **Betydningen af fældningsmidler og –processer for P gødningsværdi.**
Der ser ud til at være klar forskel på biologisk P fjernelse og kemisk fældning, men der mangler viden om hvordan forskellige kemiske fældningsmidler/metoder og deres dosering påvirker produktets gødningsvirkning, både på kort og længere sigt.
- **Betydning af struvit-fældning for restsлам kvalitet.**
Det ser ud til at struvit som oftest giver en særdeles høj relativ gødningsvirkning når det teste i potte- eller markforsøg. Der mangler imidlertid totalt studier der samtidig undersøger struvit-fældningens indflydelse på restsلامets kvalitet og gødningsvirkning.
- **Der mangler i det hele taget solide studier af gødningsvirkning på kort og langt sigt, der muliggør reel sammenligning af forskellige alternativer i spildevands- og slambehandlingsprocesserne.**
Dette forudsætter, at de eksperimentelle behandlinger starter inde i spildevandsprocessen, for at sikre isolering af de enkelte parametres virkning.
- **Metoder til behandling og opgradering af slamaske.**
Der er udviklet en lang række termo-kemiske metoder til behandling af slamaske, men som det fremgår af Adam et al. (2015) er ikke mange af dem pt. økonomisk rentable. Der er derfor behov for dels at kigge på under hvilke forhold slamaske kan fungere som en effektiv gødning på såvel kort som længere sigt, dels at finde alternative behandlingsmetoder (biologisk-kemiske, mikrobielle) til at øge slamaskens relative gødningsværdi for flere afgrøder og jordtyper.
- **Der mangler mere standardiserede metoder til at kvantificere nye slamprodukters og affaldsbaserede gødningsmidlers relative fosfor-virkningsgrad** i forhold til standard handelsgødning, på såvel kort som længere sigt.

LITTERATUR

Adam C., Eicher N., Hermann L., Herzel H., Mallon J., Schaaf M., Stemann J. 2015. Technical comparison on the design, operation and performances of ash processes. Deliverable D 4.1 Comparative review of ash processes of the P-REX project, online at http://p-rex.eu/uploads/media/P-REX_D4_1_Comparative_review_of_ash_processes.pdf

Cabeza, R., Steingrobe, B., Römer, W., Claasen, N. 2011. Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91, 173-184.

Delin, S. 2015. Fertilizer value of phosphorus in different residues. *Soil Use and Management*, 32, 17-26.

Ebeling, A.E., Cooperband, L.R., Bundy, L.G. 2003. Phosphorus availability to wheat from manures, biosolids, and an inorganic fertilizer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34, 1347-1365.

Egle L., Rechberger H., Zessner M. (2015) Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater. *Resources, Conservation and Recycling* 105, 325–346.

Frossard, E., Slnaj, S., Zhang, L.-M., Morel, J.L. 1996. The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1248-1253.

González-Ponce, R., López-de-Sá, E.G., Plaza, C. 2009. Lettuce response to phosphorus fertilization with struvite recovered from municipal wastewater. *HortScience* 44, 426-430.

Ingvertsen S.T., Magid J., Thaysen E.M. og Jensen L.S. 2010. Videnssyntese og factsheets om: Genanvendelse af spildevandsslam og anden affaldsbiomasse til jordbrugsformål. 2. udgave, København, april 2010. Institut for Jordbrug og Økologi og Brancheforeningen for Genanvendelse af Organiske Restprodukter til Jordbrugsformål (<http://bgorj.dk/>) 109 pp.

Johnston, A.E., Richards I.R. 2001. Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. *Soil Use and Management* 19, 45-49.

Kabbe, C., Kraus, F., Remy, C., 2015. Review of promising methods for phosphorus recovery and recycling from wastewater. In: *International Fertiliser Society Proceedings*, vol. 763, ISBN 978-085-310-4001, pp. 1–29.

Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., Heikkinen, J. 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science and Technology* 49, 2115-2122.

Karunanithi, R., Szogi, A.A., Bolan, N., Naidu, R., Loganathan, P., Hunt, P.G., Vanotti, M.B., Saint, C.P., Ok, Y.S., Krishnamoorthy, S. 2015. Phosphorus recovery and reuse from waste streams. *Advances in Agronomy*, Volume 131, 173-250.

Krogstad, T., Sogn, T.A., Asdal, Å., Sæbø, A. 2005. Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorus in soil. *Ecological Engineering* 25, 51-60.

Lemming, C., Bruun, S., Jensen, L.S. and Magid, J. 2015. Effects of thermal drying on phosphorus availability from sewage sludge, abstract for poster presented on' RAMIRAN 2015 – 16th International Conference, Hamburg University of Technology (TUHH), 8th-10th September 2015'.

- Lemming C., Oberson A., Hund A., Jensen L.S., Magid J., in review. Early maize root and phosphorus uptake responses to localised application of sewage sludge derived fertilisers. *Plant & Soil*, submitted.
- Lemming, C. upublicerede data.
- Magid, J., Lemming, C., Peltre, C. 2016. Gødningseffekt ved recirkulering og langtidsvirkning på jordfrugtbarheden. Plantekongres 2016, Tema: Økologi – Næringsstofferne retur til markerne!
- Massey, M.S., Davis, J.G., Ippolito, J.A., Sheffield, R.E. 2009. Effectiveness of recovered magnesium phosphates as fertilizers in neutral and slightly alkaline soils. *Agronomy Journal* 101, 323-329.
- Nanzer, S., Oberson, A., Berger, L., Berset, E., Hermann, L., Frossard, E. 2014. The plant availability of phosphorus from thermo-chemically treated sewage sludge ashes as studied by ³³P labeling techniques. *Plant and Soil* 377, 439-546.
- O'Conner, G.A., Sarkar, D., Brinton, S.R., Elliot, H.A., Martin, F.G. 2004. Phytoavailability of biosolids phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 33, 703-712.
- Vestergaard, A., 2015 Positiv effekt af fosfor fra restprodukter til vårbyg. I: Pedersen, J.B. Oversigt over landsforsøgene 2015 - Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Planter & Miljø, Aarhus N, ISBN 978-87-93051-00-3, 238-241.
- Petersen, J., 2003. Nitrogen fertiliser value of sewage sludge, composted household waste and farmyard manure. *J. Agric. Sci.* 140, 169-182.
- Petersen, S.O., Henriksen, K., Mortensen, G.K., Krogh, P.H., Brandt, K.K., Sørensen, J., Madsen, T., Petersen, J., Grøn, C., 2003a. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. *Soil Tillage Research* 72, 139-152.
- Petersen, S.O., Petersen, J., Rubæk, G.H. 2003b. Dynamics and plant uptake of nitrogen and phosphorus in soil amended with sewage sludge. *Applied Soil Ecology* 24, 187-195.
- Roberts, T.L., Johnston, A.E., 2015. Phosphorus use efficiency in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 275-281
- Sckerl, S.A. 2012. Historisk stor andel af spildevandsslam til jordbrug. *Teknik og Miljø* 2, 54-55.
- Severin, M., Breuer, J., Rex, M., Stemann, J., Adam, C., Van den Weghe, H., Küche, M. 2014. Phosphate fertilizer value of heat treated sewage sludge ash. *Soil Environment* 60, 555-561.
- Soon, Y.K., Bates, T.E. 1982. Extractability and solubility of phosphate in soils amended with chemically treated sewage sludges. *Soil Science* 134, 89-996.
- Vogel, T., Nelles, M., Eichler-Löbermann, B. 2015. Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. *Ecological Engineering* 83, 466-475.
- Wilken, V., Zapka, O., & Muskolus, A. 2015. Product quality: fertilizing efficiency, results of pot and field tests. In: Final International Workshop Proceedings - P-REX Consortium. Online at http://p-rex.eu/uploads/media/3_P-REX_pot_tests_and_field_trials_Wilken.pdf

APPENDIX - OVERSIGTSTABEL

Oversigt over de studier og undersøgelser der indgår i opgørelsen af P gødningsvirkning af forskellige typer spildevandsslam og afledte produkter.

Opgørelsen er grupperet i forhold til den sidste proces i slamprocessen, dvs. slamprodukterne i kategorien "kemisk fældet" indbefatter slamprodukter der er kemisk fældet samt produkter der har været udsat for biologisk P fjernelse og yderligere kemisk fældet.

Antal af forsøgsled/behandlinger (n) der indgår, er anført efter gødningsvirkning for hvert slamprodukt.

Gødningsvirkning er opgjort som øgning (i forhold til ugødet) i henholdsvis udbytte/plantebiomasse eller P optag per enhed tilført P i slamproduktet i forhold til den tilsvarende øgning ved tilførsel af handelsgødning P (typisk i form af triplesuperfosfat, TSP). Kun forsøg med en positiv respons på handelsgødning P er medtaget. Der indgår såvel potte- som markforsøg, og forskellige afgrøder/plantearter og jordtyper (som angivet i tabellen).

Ref.	Forsøgsdetaljer (planteart, Markforsøg alle andre potteforsøg)	P tilførsels- rate (kg P/ha eller som anført)	Øvrige gødnings forhold	Slamprodukt (behandlings- proces)	Jord P status (mg P/kg)	Jord pH	Jord type	Gødningsvirkning (% i forhold til TSP)		Noter
								målt på udbytte	målt på P optag	
Biologisk fosforfjernelse i spildevandet										
5	Bahia-græs	56 – 224	Ens gødning, N overskud	Biologisk P fjernelse	Total P: 18.8 – 103	5.3	Sand jord	101-175 (n=8)	66-134 (n=8)	
17	Majs	188	Ens gødning	Biologisk P fjernelse	Lav	4.9- 7.1	Jord + sand	73-101 (n=4)	Ingen data	
Kemisk fosforfjernelse i spildevandsprocessen										
5	Bahia-græs	56 - 224	Ens gødning, N overskud	FeCl ₃	Total P: 18.8 – 103	5.3	Sand jord	80-120 (n=8)	38-87 (n=8)	
				Biologisk P fjernelse + Al				90-127 (n=4)	45-113 (n=4)	
14	Vårbyg, M	60	Ens gødning, N overskud	Fe eller Al	Lav, Olsen-P: 19-36	-	-	45-59 (n=2)	Ingen data	
13	Rajgræs	0.8 g P/pot (model)	Ens gødning	Fe	Lav	-	Sand jord	Ingen data	283 (n=1)	
15	Majs, Sorghum, Amaranth, Foderrug	200 mg P /plot	Ens gødning	Fe	Dobb.-laktat-opl.-P: 40.1	5.19	Loamy sand	-78-210 (n=3)	-19-69 (n=4)	Foderrug gav lavt udbytte, sorghum gav højt udbytte . Amaranth gav meget lavt P optag
16	Rajgræs	12	Ens gødning, N overskud	Ca	Ammon.-laktat-P: 3	6.2	Sand jord	67 (n=1)	Ingen data	
17	Majs	188	Ens gødning	Fe	Lav	4.9- 7.1	Jord + sand	52-68 (n=2)	Ingen data	

Stabiliseringsprocessesering (anaerob/aerob udrådning)										
5	Bahia-græs	56 - 224	Ens gødning, N overskud	Aerob	Total P: 18.8 - 103	5.3	Sand jord	60-102 (n=4)	54-112 (n=4)	
				Anaerob				25-70 (n=4)	32-69 (n=4)	
7	Vårbyg	80 mg P/kg	Ens gødning, N- overskud	Anaerob	Moderat, total-P:673, blandet med sand)	~7-7.5	Lerjord iblandet sand	100 (n=1)	34 (n=1)	Målt efter kun 6 ugers vækstperiode
18	Majs	40	Ens gødning, N overskud	Anaerob	Lav, total-P: 222 blandet med sand	6.2	Sandy loam - blandet med sand	I skud: 129 (n=1)	I skud: 140 (n=1)	Målt efter kun 4 ugers vækstperiode
1	Rajgræs	87 mg P/kg	Ens gødning	Aerob og Anaerob	Lav P og høj P	5.8- 6.5	Loam og ler jord	21-125 (n=6)	59-103 (n=6)	Højt udbytte var i høj P og neutral pH jord
6	Rajgræs	60	Ens gødning	Anaerob	Total P: 413	5.07	Moræne- jord	Ingen data	-12-10 (n=2)	
13	Rajgræs	0.8 g P/pot (model)	Ens gødning	Anaerob	Lav	-	Sand jord	Ingen data	-50-250 (n=5)	Lav P optag skyldes enten høj Fe:P ratio, eller kalk tilførsel
19	Vårbyg	50 mg P/kg	Ens gødning, N- overskud	Anaerob	Lav	6.9	Lerjord iblandet sand	76 (n=1)	69 (n=1)	Kun 6 ugers vækstperiode
3	Vinterhvede	101 202	Ens gødning	Anaerob	Mehlich-3P: 21	6.7	Silt loam	275 (n=1)	162 (n=1)	Sammenlignet med CaHPO ₄
16	Rajgræs	12	Ens gødning, N overskud	udrådnet	Ammon.laktat-P: 30	6.2	Sand jord	67 (n=1)	Ingen data	Rajgræs var potte forsøg, Vårhvede var markforsøg
	Vårhvede	16			<10	7.2?	Ler jord	40 (n=1)	Ingen data	
	Rajgræs	12		udrådnet	30	6.2	Sand jord	67 (n=1)	Ingen data	
	Vårhvede	16			<10	7.2?	Ler jord	40 (n=1)	Ingen data	
Stabiliseringsprocessesering (kompostering)										
13	Rajgræs	0.8 g P/pot (model)	Ens gødning	Komposteret	Lav	-	Sand jord	Ingen data	183 (n=1)	
6	Rajgræs	60	Ens gødning	Komposteret	Total P: 413	5.07	Moræne- jord	Ingen data	100 (n=1)	
5	Bahia-græs	56-224	Ens gødning, N overskud	Komposteret	Total P: 18.8 - 103	5.3	Sand jord	0-118 (n=8)	24-55 (n=8)	Kompostering og Fe reducerede P tilgængelighed men ikke Kompostering alene

Termisk tørring										
5	Bahia-græs	56-224	Ens gødning, N overskud	Tørret	Total P: 18.8 - 103	5.3	Sand jord	10-112 (n=8)	26-96 (n=8)	Tørring reducerede P tilgængelighed meget (i forhold til samme slam)
6	Rajgræs	60	Ens gødning	Tørret	Total P: 753	6.7	Moræne- jord	Ingen data	-2 (n=1)	
7	Vårbyg	80 mg P/kg	Ens gødning, N- overskud	Tørret	Moderat, Total-P: 673, blandet med sand	~7-7.5	Lerjord iblandet sand	I skud: 70 (n=1)	I skud: 63 (n=1)	Kun 6 ugers vækstperiode
Struvitudfældning										
14	Vårbyg, M	60		Struvit	Lav			100 (n=1)	Ingen data	
10	Majs 1. og 2. år	60	Ens gødning	Struvit	Ca-amm.-laktat-P: 21.0 - 24.2	4.7 - 6.6	Loam og sand	Ingen data	67-133 (n=12)	
2	Rajgræs	87 mg P /pot	Ens gødning	Struvit	Olsen P: 11 - 28 mg/L	6.6 - 7.1	Sandy loam og sandy clay loam	96-133 (n=8)	Ingen data	
8	Vårhvede	45-90	N status forskellig i jordene	Struvit	Mehlich-3P: 31 - 44	6.5- 7.6	Fine-loamy to sandy	67-81 (n=2)	59-115 (n=2)	Lavere P optag i høj P jord
15	Majs, Sorghum, Amaranth, Foderrug	200 mg P /plot	Ens gødning	Struvit	Dobb.-laktat-opl-P: 40.1	5.19	Loamy sand	228-350 (n=3)	139-210 (n=4)	
9	Salat	4-20 mg P /kg	Ens gødning	Struvit	Tilgængelig-P: 19.6	5.9	Loamy sand	117-167 (n=5)	Ingen data	
13	Rajgræs	0.8 g P/pot (model)	Ens gødning	Struvit	Lav	-	Sand jord	Ingen data	250 (n=1)	
17	Majs	188	Ens gødning	Struvit	Lav	4.9- 7.1	Jord + sand	62-106 (n=6)	Ingen data	Lavest i lav pH jord
19	Vårbyg	50 mg P/kg	Ens gødning, N- overskud	Struvit	Lav	6.9	Lerjord iblandet sand	43 (n=1)	47 (n=1)	Kun 6 ugers vækstperiode

Aske										
Ubehandlet										
15	Majs, Sorghum, Amaranth, foder rug	200 mg P /plot	Ens gødning	Aske	Dobb.-laktat-opl.-P: 40.1	5.19	Loamy sand	-222-270 (n=3)	4-52 (n=4)	Meget lav udbytte i foder rug og højt i sorghum, lavt P optag i Amaranth
11	Majs	0.18-0.52 g P/pot	Ens gødning	Aske	Lav, Ca-amm.-laktat-P: 11.4	7.35	Sandy soil	-19-2 (n=3)	-25-0 (n=3)	
17	Majs	188	Ens gødning	Aske	Lav	4.9-7.1	Jord + sand	19-53 (n=2)	Ingen data	
18	Majs	40	Ens gødning, N-overskud	Aske	Lav, total P: 222 blandet med sand	6.2	Sandy loam - blandet med sand	140 (n=1)	98 (n=1)	Kun 4 ugers vækstperiode
19	Vårbyg	50 mg P/kg	Ens gødning, N-overskud	Aske	Lav	6.9	Lerjord iblandet sand	53 (n=1)	27 (n=1)	Kun 6 ugers vækstperiode
Behandlet										
10	Majs: 1.år	60	Ens gødning	Slam-slagger smeltet med limestone	Ca-amm.-laktat-P: 21-24.2	4.6-6.7	Loam og sand	Ingen data	11-75 (n=2)	”Cupola slag”
	2. år			17-25 (n=2)						
	1. år			Brændt (P mest på form: Ca ₄ Mg ₅ (PO) ₄ og Ca ₅ (PO) ₄ Cl _{1-x} (OH) _x)					105-135 (n=2)	Højest tilgængelighed 1. år
	2. år			41-48 (n=2)						
15	Majs, Sorghum, Amaranth, Foder rug	200 mg P /plot	Ens gødning	Al fældet, brændt, syrebehandlet	Dobb.-laktat-opl.-P: 40.1	5.19	Loamy sand	-222-180 (n=3)	17-88 (n=4)	Meget lav udbytte i foder rug og sorghum, lavt P optag i Amaranth
				Al fældet, brændt, CaCl ₂ , genopvarmet, syrebehandlet				33-188 (n=6)	49-111 (n=8)	Lav udbytte i foder rug, lavt P optag i Amaranth
				Al fældet, brændt, MgCl ₂ , genopvarmet, syrebehandlet				-267-240 (n=6)	60-206 (n=8)	Meget lavt udbytte i foder rug og sorghum, meget højt P optag i Majs og lavest i amaranth
11	Majs	0.18 -0.52	Ens gødning	Behandlet med	Lav,	7.35	Sandy soil	85-133	76-133	

		g P/pot		kalk	Ca-amm.-laktat-P: 11.4			(n=6)	(n=6)	
19	Vårbyg	50 mg P/kg	Ens gødning, N-overskud	AshDec, MgCl ₂	Lav	6.9-	Lerjord iblandet sand	72 (n=1)	54 (n=1)	Kun 6 ugers vækstperiode
17	Majs	188	Ens gødning	Forskellige: AshDec-MgCl ₂ , -Na ₂ CO ₃ , Mephrec, LeachPhos	Lav	4.9- 7.1	Jord + sand	-8-91 (n=8)	Ingen data	
12	Rajgræs	50 mg P/kg	Ens gødning	Fe fældet, CaCl ₂ , genopvarmet	P _i fra ignition/ ekstraktion: 119-752	4.5- 8.2	Silt jord, ler jord, svær lerjord	15-34 (n=2)	-2-24 (n=3)	Markant faldende udbytte og P optag med stigende pH og jord P
				Fe fældet, MgCl ₂ , genopvarmet				85-91 (n=2)	-7-116 (n=3)	Markant faldende udbytte og P optag med stigende pH og jord P

Referencer:

1. Frossard, E., Slnaj, S., Zhang, L.-M., Morel, J.L. 1996. The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems. Soil Science Society of America Journal 60, 1248-1253.
2. Johnston, A.E., Richards I.R. 2001. Effectiveness of different precipitated phosphates as phosphorus sources for plants. Soil Use and Management 19, 45-49.
3. Ebeling, A.E., Cooperband, L.R., Bundy, L.G. 2003. Phosphorus availability to wheat from manures, biosolids, and an inorganic fertilizer. Communications in Soil Science and Plant Analysis 34, 1347-1365.
4. Petersen, S.O., Petersen, J., Rubæk, G.H. 2003. Dynamics and plant uptake of nitrogen and phosphorus in soil amended with sewage sludge. Applied Soil Ecology 24, 187-195.
5. O'Conner, G.A., Sarkar, D., Brinton, S.R., Elliot, H.A., Martin, F.G. 2004. Phytoavailability of biosolids phosphorus. Journal of Environmental Quality 33, 703-712.
6. Krogstad, T., Sogn, T.A., Asdal, Å., Sæbø, A. 2005. Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorus in soil. Ecological Engineering 25, 51-60.
7. Lemming, C., Bruun, S., Jensen, L.S. and Magid, J. (2015): Effects of thermal drying on phosphorus availability from sewage sludge, abstract for poster presented on' RAMIRAN 2015 – 16th International Conference, Hamburg University of Technology (TUHH), 8th-10th September 2015'.
8. Massey, M.S., Davis, J.G., Ippolito, J.A., Sheffield, R.E. 2009. Effectiveness of recovered magnesium phosphates as fertilizers in neutral and slightly alkaline soils. Agronomy Journal 101, 323-329.
9. González-Ponce, R., López-de-Sá, E.G., Plaza, C. 2009. Lettuce response to phosphorus fertilization with struvite recovered from municipal wastewater. HortScience 44, 426-430.
10. Cabeza, R., Steingrobe, B., Römer, W., Claasen, N. 2011. Effectiveness of recycled P products as P fertilizers, as evaluated in pot experiments. Nutrient Cycling in Agroecosystems 91, 173-184.

11. Severin, M., Breuer, J., Rex, M., Stemann, J., Adam, C., Van den Weghe, H., Küche, M. 2014. Phosphate fertilizer value of heat treated sewage sludge ash. *Soil Environment* 60, 555-561.
12. Nanzer, S., Oberson, A., Berger, L., Berset, E., Hermann, L., Frossard, E. 2014. The plant availability of phosphorus from thermo-chemically treated sewage sludge ashes as studied by 33P labeling techniques. *Plant and Soil* 377, 439-546.
13. Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., Heikkinen, J. 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science and Technology* 49, 2115-2122.
14. Vestergaard, A., 2015 Positiv effekt af fosfor fra restprodukter til vårbyg. I: Pedersen, J.B. Oversigt over landsforsøgene 2015 - Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Planter & Miljø, Aarhus N, ISBN 978-87-93051-00-3, 238-241.
15. Vogel, T., Nelles, M., Eichler-Löbermann, B. 2015. Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. *Ecological Engineering* 83, 466-475.
16. Delin, S. 2015. Fertilizer value of phosphorus in different residues. *Soil Use and Management*, 32, 17-26.
17. Wilken, V., Zapka, O., & Muskulus, A. 2015. Product quality: fertilizing efficiency, results of pot and field tests. Online presentation. http://p-rex.eu/uploads/media/3_P-REX_pot_tests_and_field_trials_Wilken.pdf
18. Lemming C., Oberson A., Hund A., Jensen L.S., Magid J., in review. Early maize root and phosphorus uptake responses to localised application of sewage sludge derived fertilisers. *Plant & Soil*, submitted.
19. Lemming et al. Unpublished



Resume

Denne rapport er et litteratur review af i alt 19 studier og undersøgelser (potte- og markforsøg) af fosfor (P) gødningsvirkning af forskellige typer spildevandsslam og afledte produkter i forskellige plantearter og jordtyper er gennemført med henblik på at opgøre den relative gødningsvirkning i forhold til en uorganisk handelsgødning som fosforkilde.

Sammenstillingen viser at fosfor tilgængeligheden af slamprodukter varierer, afhængig af hvordan produkterne er afledt og behandlet i spildevands- og slamprocessen. Struvit og slam fra spildevandsrensning med biologisk P-fjernelse viste sig at give højeste fosfor gødningsvirkning, samme eller højere ift. handelsgødning. De laveste fosfor gødningsvirkninger viste sig for tørret slam og ubehandlet slamaske. Behandlet slamaske har dog i flere studier vist højere plantetilgængelighed end ubehandlet slamaske.

